



СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

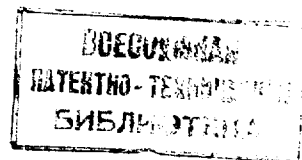
(09) SU (11) 1329502

A1

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

(51)5 H 01 L 21/66. G 01 H 7/00,  
G 01 R 31/26

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ И АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



(46) 23.07.93. Бюл. № 27

(21) 3899574/25

(22) 20.05.85

(71) Минский радиотехнический институт

(72) Д. В. Лифанов

(56) Фишер В. Методы ускорения испытаний микроэлектронных элементов. - Зарубежная радиоэлектроника. 1982, № 11, с. 3-10.

Концевой Ю.А. и др. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов. М.: Радио и связь, 1982, с. 240.

(54) СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОДНОТИПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

(57) Изобретение относится к механическим испытаниям, а именно к способам контроля долговечности полупроводниковых материалов и элементов на их основе, и может быть использовано для оценки долговечности полупроводниковых кристаллов в микроэлектронных изделиях. Цель изобретения - обеспечение возможности прогнозирования долговечности функционирования кристаллов в микроэлектронном изделии. Согласно изобретению к полупроводниковым пластинам с равными максимальными и минимальными значениями остаточных механических напряже-

ний в приповерхностной зоне контролируемых кристаллов, сформированных на пластине, прилагают несимметричную нагрузку. Пластины предварительно снабжают проволочными связями, с помощью которых электрически контролируют отказ функционирования кристаллов. Геометрический центр каждой испытываемой пластины совпадает с геометрическим центром контролируемого электрически функционирующего кристалла. Часть пластин подвергают различным разрушающим нагрузкам, измеряют время, которое нагруженные пластины выдерживают до разрушения и расчетным путем определяют границы диапазона значений структурно-параметрического коэффициента  $\gamma$ . К остальным пластинам прилагают различные нагрузки, меньшие разрушающих, измеряют время наступления отказа в функционировании нагруженных кристаллов и исходя из диапазона значений коэффициента  $\gamma$  рассчитывают предельные значения энергии активации отказа. Временные пределы долговечности функционирования контролируемых кристаллов определяют расчетным путем по формуле, исходя из значений напряжений посадки кристаллов в микроэлектронных изделиях и из предельных значений энергии активации отказа. 7 ил.

(09) SU (11) 1329502  
A1

Изобретение относится к механическим испытаниям, а именно к способам контроля долговечности полупроводниковых материалов и элементов на их основе, и может быть использовано для оценки долговечности функционирования полупроводниковых кристаллов в микроразлектронных изделиях.

Цель изобретения — обеспечение возможности прогнозирования долговечности функционирования структур в микроэлектронном изделии.

На фиг. 1 представлена схема нагрузочного устройства, реализующего предлагаемый способ контроля; на фиг. 2 — график зависимости энергии активации  $U(\sigma)$  разрушения полупроводникового материала от механических напряжений  $\sigma$ ; на фиг. 3 — зависимости нагрузки разрушения  $P_p$  от значений остаточных механических напряжений  $\sigma_{ост}$  в приповерхностной зоне кристаллов; на фиг. 4 — график зависимости нагрузки  $P_n$  отказа в функционировании контролируемых структур от значений остаточных механических напряжений  $\sigma_{ост}$ ; на фиг. 5 — график зависимости энергии активации  $U(\sigma)$  для структур с максимальным остаточным механическим напряжением  $\sigma_{ост}^{max} = 4,62 \text{ кг/мм}^2$ ; на фиг. 6 — график зависимости  $U(\sigma)$  для структур с минимальным остаточным механическим напряжением  $\sigma_{ост}^{max} = 1,33 \text{ кг/мм}^2$ ; на фиг. 7 — номограмма для выбора значения  $\sigma_{ост}$ , удовлетворяющего условию эксплуатационной долговечности  $\tau_{зд}$  функционирования данного типа структур в изделии.

Схема устройства (фиг. 1) включает встречно направленные кольцевидные осесимметричные нагрузочную опору 1 и нижнюю опору 2. Нагрузка со стороны нагрузочной опоры через контролируемую полупроводниковую пластину 3 передается нижней опоре. Последняя обладает возможностью осесимметрично перемещаться в углублении стакана 4 и опирается на датчик 5 давления. Датчик 5 давления электрически связан с усилителем 6, а последний с осциллографом 7 и самописцем 8, что в совокупности составляет измерительный канал величины и времени действия контрольных нагрузок. На этапе контроля функционирования полупроводниковых структур с заданным параметром с помощью проволочных связей 9

посредством коммутирующего устройства 10 осуществляется измерение динамических характеристик контролируемых структур с помощью 11, который в свою очередь имеет выход на самописец.

Прямые 12, 13, 14 иллюстрируют значение структурного коэффициента  $\delta$  и связывают значение экспериментальной энергии активации  $U_p$  разрушения полупроводниковой структуры отложенное на оси абсцисс, со значением минимального напряжения  $\sigma_p$  (на оси ординат), при котором за минимальное время  $\tau_p$  происходит разрушение одной из контролируемых на прочность полупроводниковых пластин. Прямая 15 связывает значение энергии активации  $U_0$  разрушения полупроводникового материала с искомым минимальным напряжением разрушения  $\sigma_p$ , при котором процесс разрушения полупроводниковой пластины осуществлялся бы за время периода  $\tau_0$  собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке твердого тела.

Прямые 16, 17, 18 связывают экспериментально определенное минимальное значение экспериментального порога напряженности  $\sigma_{эп}$  с минимальным значением экспериментальной энергии активации  $U_{эп}$  отказа в функционировании структуры.

Прямые 19, 20, 21 связывают истинное минимальное значение энергии активации отказа  $U_n$  функционирования структуры с минимально допустимым значением порога напряженности  $\sigma_n$ .

**Пр и м е р.** Контроль осуществляют на кремниевых пластинах, на которых методами К-МОП технологии были изготовлены кристаллы ОЗУ типа КР 188 РУ2. Из полупроводниковых пластин ( $\phi$  76 мм), прошедших производственный контроль и разбраковку по статическим параметрам сформированных в них структур, вырезают квадратные пластины размером 19,1x19,1 мм<sup>2</sup>. Пластины вырезают с учетом следующих требований:

геометрический центр пластин (точка пересечения диагоналей) должен совпадать с геометрическим центром параметрически годной по статическим параметрам структуры;

стороны пластины должны быть параллельны сторонам расположенной в ее центре контролируемой структуры.

Поскольку на пластине кроме контролируемой структуры находятся и другие, то для локализации контрольных механических напряжений в контролируемой структуре ( $2,4 \times 2,6 \text{ мм}^2$ ) используют кольцевые опоры со следующими геометрическими размерами: радиус нижней опоры  $0,6 \text{ мм}$ , радиус нагрузочной  $9,5 \text{ мм}$ . К контактным площадкам контролируемых структур с помощью ультразвуковой микросварки приваривают алюминиевые проволочки  $\phi 35 \text{ мкм}$ , после чего все пластины проходят контроль динамических параметров. Параметрически годные пластины подвергают контролю остаточных механических напряжений в тонких приповерхностных слоях контролируемых структур. Контроль осуществляют с помощью рентгенофотографического метода и он заключается в сканировании поверхности контролируемой структуры (не менее пяти точек измерений) с измерением разности полуширины дифракционных пиков исследуемого и эталонного образцов. Величину остаточных механических напряжений рассчитывают согласно ОСТ. 11.073.013-80 (ОСТ-В11 091.210-77). Исходя из расчетных максимальных и равных остаточных механических напряжений, осуществляют отборку и группировку пластин для дальнейших испытаний. Из 185 пластин было отобрано 20 со значениями  $\sigma_{ост}^{макс} = 4,62 \text{ кг/мм}^2$  (максимальное значение) и 14 со значением  $\sigma_{ост}^{мин} = 1,33 \text{ кг/мм}^2$  (минимальное значение). Пластины из числа  $1,33 < \sigma_{ост} < 4,62$  используют для определения оптимальных значений контрольных нагрузок. Все пластины проходят контроль толщины и в зависимости от отклонения от значения  $0,400 \text{ мм}$  им присваивают при расчете механических напряжений поправочный коэффициент.

Контрольные операции выполняют в два этапа. На этапе формирования разрушающих нагрузок пластины поочередно устанавливают в нагрузочное устройство. За счет перемещения нагрузочной опоры 1 в направлении контролируемой полупроводниковой пластины 3 последняя подвергается осесимметричной изгибной деформации. Величину формируемой нагрузки определяют и поддерживают по уровню отклонения луча на экране осциллографа 7, причем с момента начала перемещения нагру-

зочной опоры приводит в действие тензопрогибающий механизм самописца 8 (НЗ38-4П), на ленте которого изображают уровень и длительность нагрузки. Совместно с изображением уровня нагрузки на ленту самописца 8 от маркера (блок ГКЧ прибора Х1-46) наносят метки времени через каждые  $0,1 \text{ с}$ . Время выдержки контролируемой полупроводниковой пластины 3 под контрольной нагрузкой до разрушения определяют путем суммирования меток времени на протяжении существования линии уровня нагрузки на ленте самописцев 8.

На этапе формирования неразрушающих нагрузок проволочные связи 9 пластины, помещенной в нагрузочное устройство, с помощью коммутирующего устройства 10 подключают к измерителю динамических параметров кристаллов (стенду 11). Процесс визуализации и записи характеристики формируемой нагрузки остается прежним. Пластины выдерживают под контрольной нагрузкой до момента появления на ленте самописца графического сигнала об отказе функционирования контролируемой структуры, который поступает на самописец со стенда. Время нахождения структуры под нагрузкой до отказа функционирования определяют путем суммирования меток времени на протяжении существования уровня нагрузки на ленте самописца до сигнала об отказе функционирования структуры. Используя часть пластин из числа  $1,33 < \sigma_{ост} < 4,62$  определяют зависимость нагрузки разрушения от  $\sigma_{ост}$  ( $P_p$  от  $\sigma_{ост}$ ) и по графику определяют приближенное значение контрольных разрушающих нагрузок для пластин с  $\sigma_{ост}^{мин} = 1,33$  и  $\sigma_{ост}^{макс} = 4,62$ . Определение указанной зависимости заключается в определении максимального значения уровня на ленте самописца при минимальных нагрузках, приводящих к разрушению пластин с равным значением  $\sigma_{ост}$ . Подобная операция производится и с оставшейся частью пластин из числа  $1,33 < \sigma_{ост} < 4,62$  для определения нагрузок, вызывающих отказ функционирования контролируемых структур. В этом случае нагрузки меньше разрушающих и контроль динамических параметров структур осуществляется в период действия нагрузки. В обоих случаях время действия нагрузок не превышает

2-3 с и так же, как и в первом случае, при определении зависимости нагрузки, вызывающей отказ функционирования, от  $\sigma_{ост}$  ( $P_n$  от  $\sigma_{ост}$ ) для графического построения используют значения минимальных нагрузок, вызывающих отказ функционирования структур с равным значением  $\sigma_{ост}$ . В качестве критерия параметрического соответствия структуры КР188РУ2 данному исполнению используют бесперебойное прохождение сигналов записи и считывания логического "0" или "1" каждой из 256 ячеек памяти. Время, необходимое для опроса и принятия решения "0" в параметрическом соответствии структуры не превышало 0,1 мс. На фиг. 3 и 4 представлены зависимости  $P_p$  от  $\sigma_{ост}$  и  $P_n$  от  $\sigma_{ост}$  соответственно, полученные в результате обработки данных контроля.

Перед контролем пластин со структур групп  $\sigma_{ост}^{мин} = 1,33 \text{ кг/мм}^2$  и  $\sigma_{ост}^{макс} = 4,62 \text{ кг/мм}^2$  последние разделяют на две подгруппы с равным числом кристаллов. На этапе определения максимального значения структурного коэффициента  $\gamma$  в качестве начальной нагрузки берут нагрузку, определенную по графику фиг. 3. Путем парциального снижения нагрузки от пластины к пластине определяют минимальную нагрузку, при которой за минимальное время происходит разрушение пластины. После пересчета минимальных нагрузок в механические напряжения разрушения для подгруппы структур с  $\sigma_{ост}^{макс} = 4,62 \text{ кг/мм}^2$  получают  $\sigma_{э}^{4,62} = 18,654 \text{ кг/мм}^2$ , а для подгруппы структур с  $\sigma_{ост}^{мин} = 1,33 = 22,606 \text{ кг/мм}^2$ , причем минимальное время до разрушения пластины при указанных напряжениях составляет  $\tau_{э}^{4,62} = 6,7 \text{ с}$  и  $\tau_{э}^{1,33} = 7,7 \text{ с}$ .

Применяя для расчета формулы

$$U_3 = U_0^{Si} - RT \ln \frac{\tau_2}{\tau_0};$$

$$\gamma = \frac{U_0^{Si}}{\sigma_p} = \frac{U_3}{\sigma_3},$$

где  $U_0^{Si}$  - энергия активации разрушения кремния;

$R$  - универсальная газовая постоянная,  $\frac{\text{ккал}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$ ;

$T$  - температура исследуемой структуры, К, с учетом того,

что  $R = 1,986457 \cdot 10^{-3} \frac{\text{ккал}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$ ;

$U_0 = 113 \text{ ккал/моль}$ , а  $T = 293 \text{ К}$ , получают следующие значения:

$$U_3^{4,62} = 94,46112 \text{ ккал/моль};$$

$$\gamma^{4,62} = \frac{U_3^{4,62}}{\sigma_3^{4,62}} = 5,063853 \frac{\text{ккал} \cdot \text{мм}^2}{\text{моль} \cdot \text{кг}}$$

$$U_3^{1,33} = 94,38011 \text{ ккал/моль};$$

$$\gamma^{1,33} = \frac{U_3^{1,33}}{\sigma_3^{1,33}} = 4,175187 \frac{\text{ккал} \cdot \text{мм}^2}{\text{моль} \cdot \text{кг}}$$

Оставшиеся структуры подгрупп

$\sigma_{ост}^{макс} = 4,62 \text{ кг/мм}^2$  и  $\sigma_{ост}^{мин} = 1,33 \text{ кг/мм}^2$  подвергают нагрузке с одновременным параметрическим контролем. Значения начальных нагрузок в этом случае определяют по графику (фиг. 4). Путем парциального снижения нагрузки от пластины к пластине определяют минимальную нагрузку для каждой подгруппы, при которой за минимальное время происходит отказ функционирования нагруженной структуры.

В результате контрольных замеров получены следующие результаты:

$$\tau_{эп}^{4,62} = 14,6 \text{ с}; \quad \sigma_{эп}^{4,62} = 6,275 \text{ кг/мм}^2;$$

$$\tau_{эп}^{1,33} = 8,1 \text{ с}; \quad \sigma_{эп}^{1,33} = 14,380 \text{ кг/мм}^2.$$

После графического определения значений  $U_{эп}^{4,62}$  и  $U_{эп}^{1,33}$  по формуле

$$U_n = U_{эп} + RT \ln \frac{\tau_{эп}}{\tau_0} - \text{рассчитывают значения } U_n^{4,62} \text{ и } U_n^{1,33}, \text{ которые составляют: } U_n^{4,62} = 50,83888 \text{ ккал/моль}; U_n^{1,33} = 77,37240 \text{ ккал/моль}.$$

Для определения долговечности функционирования структур КР188РУ2 в микроселектронных изделиях используют полученные с помощью тензометрических измерений данные о напряжениях посадки кристаллов. Так, при посадке кристаллов с помощью клея БК-32-200 на подложки из алюмосиликатной керамики (22ХС) напряжения посадки составляют  $\sigma_{рос} = 3,5 \text{ кг/мм}^2$ . С учетом полученных значений  $\gamma$  и  $U_n$ , применяя формулу  $\tau_n = \tau_0 \exp \frac{U_n - \gamma \sigma_{рос}}{RT}$  (1), определяют пределы долговечности функционирования

рования структур КР188РУ2, которые в диапазоне температур 213 - 403 К составляют:

$$\tau_n = 1,58 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ лет.}$$

Поскольку долговечность микроэлектронных изделий зависит от минимально возможной параметрической долговечности входящих в них кристаллов, то для удовлетворения, например, долговечности в 25 лет ( $7,884 \cdot 10^8$  с) напряжение посадки структур КР188РУ2, удовлетворяющее заданную долговечность, может быть определено как

$$\sigma_{\text{пос.}\tau} = (U_n^{4,62} - RT \ln \frac{\tau_{\text{зад}}}{\tau_0}) \frac{1}{\gamma^{4,62}} = 2 \cdot 0,69 \text{ кг/мм}^2,$$

где  $\sigma_{\text{пос.}\tau}$  - напряжение посадки кристаллов, удовлетворяющее условию эксплуатационной долговечности функционирования;

$\tau_{\text{зад}}$  - заданная эксплуатационная долговечность функционирования структур ( $\tau_{\text{зад}} = 25$  лет).

В случае невозможности удовлетворить заданную  $\tau_{\text{зад}}$  путем обеспечения  $\sigma_{\text{пос.}\tau}$  требуется проведение сортировочных исследований кристаллов методом рентгенотопографии, чтобы избежать отбраковочных испытаний микроэлектронных изделий, так как они экономически не выгодны, последнее тем более необходимо, когда осуществляется оперативный мелкосерийный выпуск микроэлектронных изделий. В этом случае требуется определить минимальное значение  $\sigma_{\text{ост}}$ , при котором достигается условие эксплуатационной долговечности функционирования кристаллов в микроэлектронном изделии. Для этой цели можно воспользоваться простой номограммой, построенной на основании проведенного контроля и представленной на фиг. 7. Используя номограмму, приведенную на фиг. 7, и формулу (1) при  $\sigma_{\text{пос.}\tau} = 3,5 \text{ кг/мм}^2$  путем подбора значений  $\gamma$  и  $U_n$ , можно определить, что долговечность функционирования в 25 лет для структур КР188РУ2 достигается при значении  $\sigma_{\text{ост}} = 1,74 \text{ кг/мм}^2$ .

Таким образом, предлагаемый способ контроля, кроме определения пределов возможностей долговечности функционирования полупроводниковых структур,

дает потребителю возможность целенаправленно применить известные и разрабатывать новые методы посадки структур в микроэлектронных изделиях, отказаться от отбраковочных испытаний изделий и проводить обоснованную сортировку структуры по значению остаточных механических напряжений.

#### Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Способ контроля долговечности однотипных полупроводниковых кристаллов, включающий воздействие осесимметричной нагрузки на идентичные полупроводниковые пластины, геометрический центр которых совпадает с геометрическим центром сформированной на них электрически функционирующей структуры, отличающийся тем, что, с целью обеспечения возможности прогнозирования долговечности функционирования структур в микроэлектронном изделии, выбирают полупроводниковые пластины с равными максимальными и минимальными значениями остаточных механических напряжений в приповерхностной зоне контролируемых кристаллов, часть из которых подвергают минимальной разрушающей нагрузке  $\sigma_{\text{э}}$ , измеряют времена  $\tau_{\text{э мин}}$  и  $\tau_{\text{э макс}}$  нахождения структур с минимальными и максимальными остаточными напряжениями соответственно в нагруженном состоянии до их разрушения, рассчитывают границы диапазона значений структурного параметра

$$\gamma_{\text{п мин}} = \frac{U_{\text{э мин}}}{\sigma_{\text{э}}}, \quad \gamma_{\text{п макс}} = \frac{U_{\text{э макс}}}{\sigma_{\text{э}}},$$

где  $\gamma_{\text{п мин}}$ ,  $\gamma_{\text{п макс}}$  - минимальное и максимальное значения структурного параметра соответственно;

$$U_{\text{э мин}} =$$

$$= U_0 - RT \ln \left[ \right]$$

$\times \frac{\tau_{\text{э мин}}}{\tau_0}$  - минимальное значение экспериментальной энергии активации разрушения структуры;

$$U_{\text{э макс}} =$$

$$= U_0 - RT \ln \left[ \right]$$

$\times \frac{\tau_{\text{э макс}}}{\tau_0}$  - максимальное значение экспериментальной энергии активации разрушения структуры;

$U_0$  - энергия разрушения полупроводникового материала;

- $\tau_0$  - период собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке твердого тела; 5
- R - универсальная газовая постоянная; 10
- T - температура структуры; 10

или отказа в функционировании структур соответственно; минимальное и максимальное значения экспериментальной энергии активации отказа в функционировании структуры соответственно;

а к остальным прилагают нагрузку  $\sigma_{эп}$  меньшую разрушающих, и измеряют время  $\tau_{эп}$  до наступления отказа в функционировании нагруженных структур по изменению заданного контролируемого параметра функционирования, рассчитывают предельные значения энергии активации  $U_n$  отказа в функционировании структур по формуле

$U_{эп мин} \text{ , } U_{эп макс}$

15 -  $U_{эп мин} = \gamma_{п мин} \cdot \sigma_{эп}$  ;  
 $U_{эп макс} = \gamma_{п макс} \cdot \sigma_{эп}$  ;

и определяют пределы долговечности  $\tau_n$  функционирования структур с заданным параметром в микроэлектронном из-

$U_{п мин} = U_{эп мин} + RT \ln \frac{\tau_{эп}}{\tau_0}$  ;

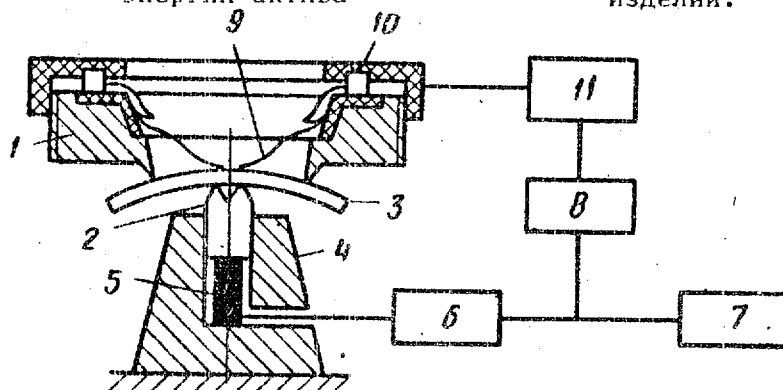
$U_{п макс} = U_{эп макс} + RT \ln \frac{\tau_{эп}}{\tau_0}$  ;

20  $\tau_0 \exp \frac{U_{п мин} - \gamma_{п мин} \sigma_{пос}}{RT} \leq \tau_n \leq \tau_0$

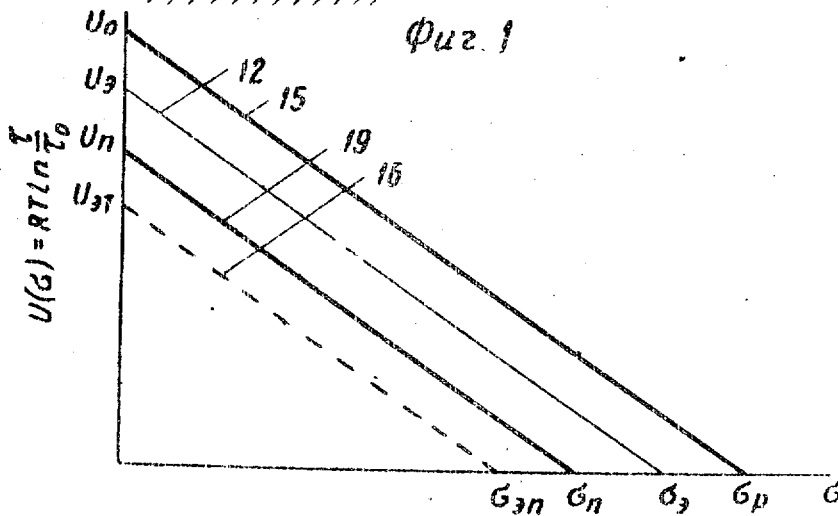
25  $\exp \frac{U_{п макс} - \gamma_{п макс} \sigma_{пос}}{RT}$  ;

• где  $U_{п мин}$  ,  $U_{п макс}$  - минимальная и максимальная энергии актива-

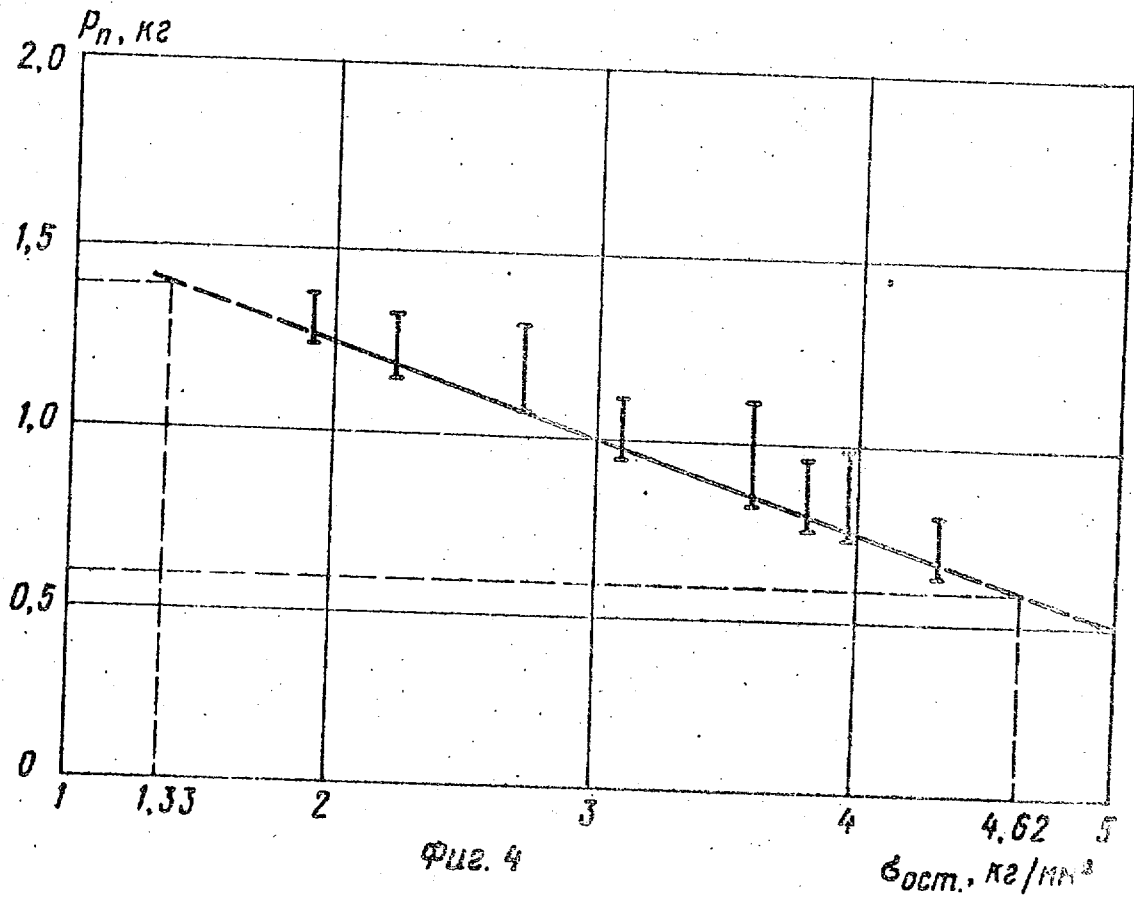
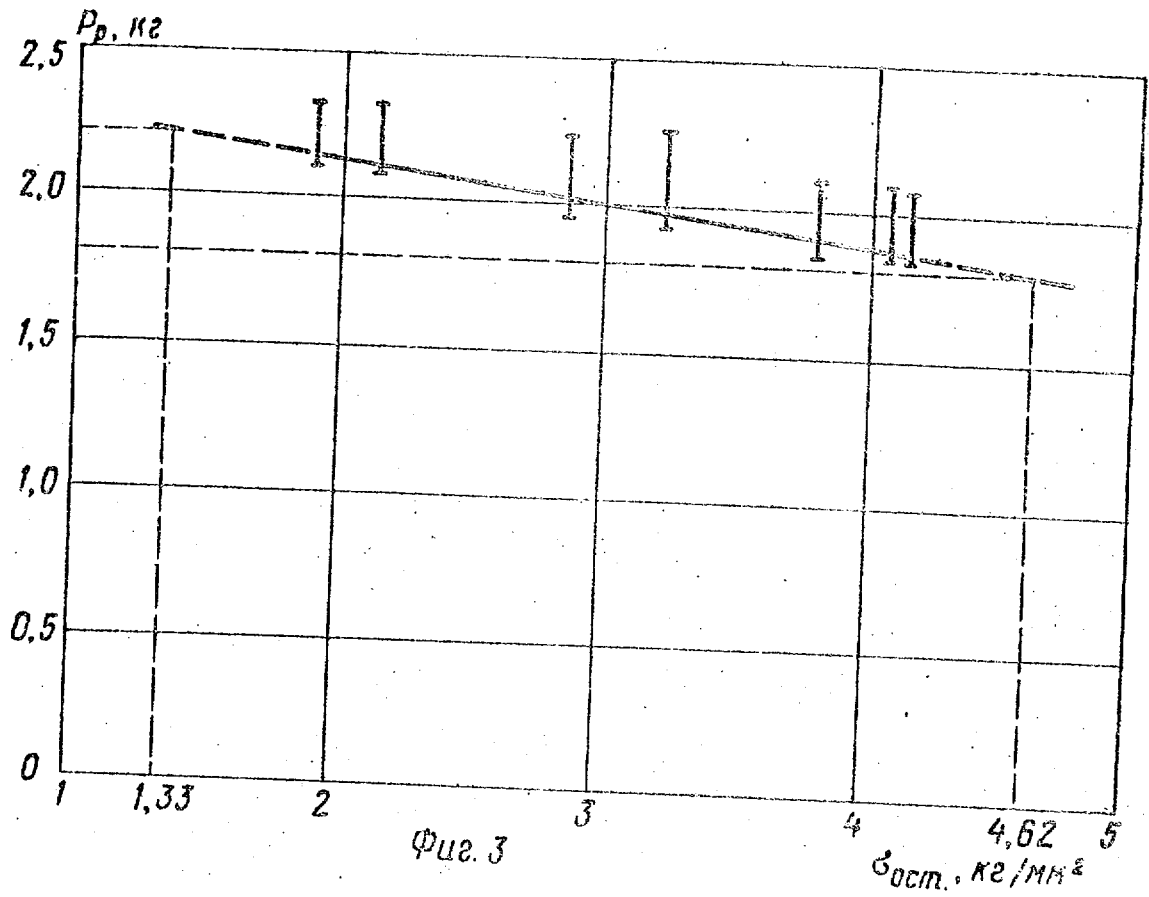
где  $\sigma_{пос}$  - напряжение посадки структуры в микроэлектронном изделии.

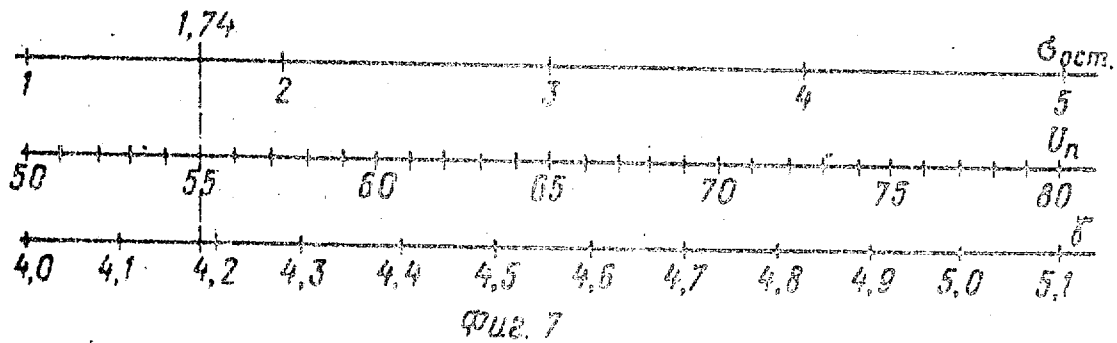
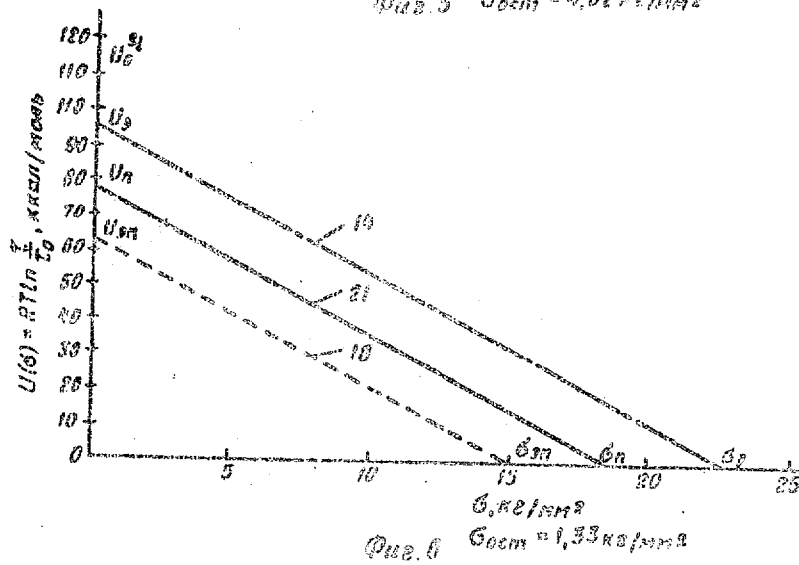
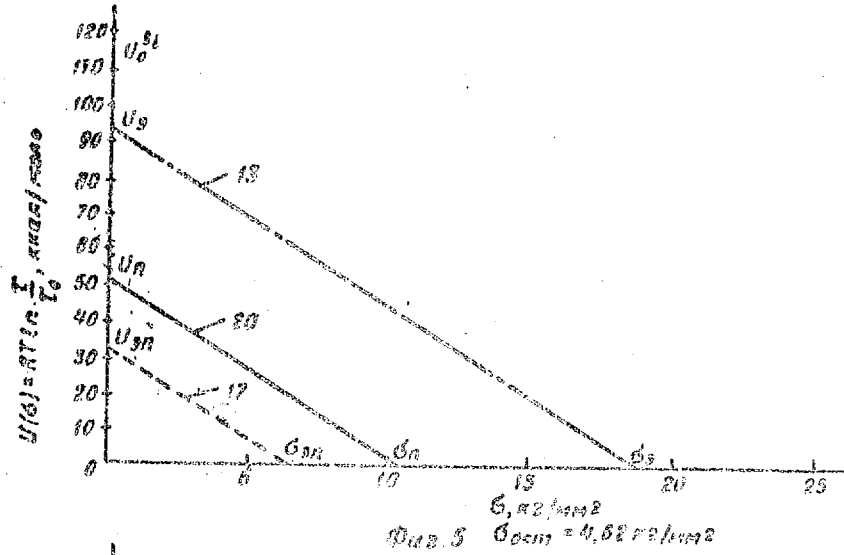


Фиг. 1



Фиг. 2





Редактор И. Курасова      Составитель И. Петрович      Корректор М. Шарова  
 Техред И. Попович

Заказ 3085      Тираж      Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР  
 по делам изобретений и открытий  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Промышленно-полиграфическое предприятие, г. Ужгород, ул. Проектная, 4